

# 新疆青河县库布苏破碎蚀变岩型金矿元素 迁移特征与规律研究

郑海平<sup>1 2 3</sup>, 朱立新<sup>2</sup>, 马生明<sup>3</sup>, 姜雨奇<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 中国地质科学院, 北京 100037;  
3. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北廊坊 065000)

[摘 要] 本文以新疆库布苏金矿北矿带为研究对象, 讨论了库布苏金矿床北矿带元素活动特征, 成矿及伴生元素、主量元素、微量元素、稀土元素的质量迁移规律; 根据稀土元素的质量迁移、地球化学特征, 初步探讨了成矿流体的环境条件和来源问题; 并依据元素迁移地球化学图研究了库布苏北矿带 105 勘探线剖面的元素质量迁移程度和范围。研究结果表明, 赋矿闪长玢岩脉及围岩的元素发生明显的带入带出作用, 元素迁移活动规律明显, 成矿阶段发生明显带入有 Au、As、Bi、Ag、Sb、K<sub>2</sub>O、SiO<sub>2</sub>, 说明引起闪长玢岩脉和接触带围岩蚀变的流体中富含 Au、As、K<sub>2</sub>O、SiO<sub>2</sub> 等, 导致这些带入元素向矿体迁移富集; 发生明显带出的有 Ba、Sr、Cu、MgO、Na<sub>2</sub>O、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO, 说明 Ba、Sr、MgO、Na<sub>2</sub>O 等受热液蚀变作用随流体迁出。矿区岩脉的稀土元素质量变化显著, 发生明显的带入带出, 岩脉交代蚀变前后的轻重稀土分馏均明显, 蚀变后的岩脉轻重稀土分馏程度有减小趋势。赋矿闪长玢岩脉稀土元素配分曲线右倾, 轻稀土富集, 轻重稀土分馏明显, Eu 强烈负异常, Ce 弱负异常, 说明库布苏金矿成矿流体条件应为较高温度和还原环境。从围岩与脉岩中元素的迁移程度和迁移范围可见, 带入的成矿指示元素有 As、W、Sb、Bi, 带出的成矿指示元素有 Mg、Na。

[关键词] 质量迁移 稀土元素特征 成矿流体 成矿指示元素 新疆库布苏金矿

[中图分类号] P595; P614; P618. 51 [文献标识码] A [文章编号] 0495-5331(2015)02-0332-13

DOI:10.13712/j.cnki.dzykt.2015.02.014

Zheng Hai-ping, Zhu Li-xin, Ma Sheng-ming, Jiang Yu-qi. Characteristics and regularities of mass transfer in the Kubusu gold deposits of clastic-altered type, in Qinghe county, Xinjiang[J]. Geology and Exploration, 2015, 51(2): 0332-0344.

东准噶尔地区为中亚造山带的重要组成部分, 是我国较重要的金成矿带之一。构造上位于西伯利亚板块与哈萨克斯坦板块接壤部位, 该区经历了自前寒武纪以来持续复杂的构造运动演化, 晚古生代发生重要的碰撞造山运动和强烈的后碰撞构造变形-岩浆活动-成矿作用。库布苏金矿床位于东准噶尔野马泉以南 16 km, 由南、北两条矿化带组成, 库布苏金矿北矿带分东西两段, 东段于 1993 年经地表评价后转入开采, 库布苏金矿南矿带于 1995 年开始断续开采至今。当前, 有关库布苏金矿床的研究文献多集中在基础地质、矿床成因等方面(吕瑞英, 1995; 高怀忠等, 1998; 高怀忠等, 2000; 王京彬

等, 2006; 何英等, 2012), 但对成矿流体的性质研究还不充分, 对矿床中元素质量迁移特征的研究还未见报导。元素的富集贫化、质量迁移特征是查找成矿指示元素、限定成矿及蚀变过程中元素活动性规律的重要手段, 已经被广泛应用到诸多地质问题中(马生明等, 2009; 艾金彪等, 2013; 胡兆鑫等, 2014)。本文以库布苏金矿床北矿带为研究对象, 根据元素质量迁移计算结果, 对元素活动特征、质量迁移规律、成矿流体的环境条件、成矿指示元素选择等问题进行了初步探讨。

[收稿日期] 2014-12-10; [修订日期] 2015-01-13; [责任编辑] 郝情情。

[基金项目] 国土资源部公益性行业科研专项项目(编号: 1212011120525) 资助。

[第一作者] 郑海平(1989 年-) 男, 在读硕士研究生, 矿床学方向。E-mail: 564788359@qq.com。

[通讯作者] 马生明(1963 年-) 男, 博士, 主要从事矿产勘查地球化学方法技术研究工作。E-mail: mashengming@igge.cn。

## 1 矿床地质背景

新疆青河县库布苏金矿床构造位置处于西伯利亚板块与哈萨克斯坦板块接壤部位的东准噶尔褶皱带中部,野马泉地块南缘晚古生代早期火山岩浆弧区(李锦轶等,1990),并处于具有韧性剪切性质的库布苏强应变构造带中(图1)。本研究区域为北矿带,位于 $F_5$ 与 $F_3$ 断裂之间的脆-韧性剪切带中, $F_3$ 断裂以北为脆性剪切带, $F_5$ 断裂以南为韧性剪切带(高怀忠等,1998)。

矿区出露地层主要是志留系库布苏群( $Skp$ ),与泥盆系为断层接触,为南矿带矿脉产出地层,岩性主要为变质砂岩、变质岩屑砂岩、含碳泥质粉砂质板岩及千枚岩等,并且在黑色板岩和硅质粉砂岩中可见零星黄铁矿;中泥盆统托让格库都克组( $D_2t$ ),为北矿带矿脉产出地层,主要为凝灰岩、凝灰质砂岩、变质砂砾岩和钙质粉砂岩等。据陕西物化探队东准噶尔地区1:20万低密度化探资料统计,库布苏群( $Skp$ )含金平均丰度为 $3.66 \times 10^{-9}$ ,是矿区内含金最高的地层;中泥盆统托让格库都克组( $D_2t$ )金的平均丰度为 $1.8 \times 10^{-9}$ ,仅次于库布苏群(高怀忠

等,1998;何英等,2012)。

矿区内断裂发育,主要为北西西(NWW)向,与卡拉麦里缝合带构造线方向一致,在矿区南部约4 km处发育一条库普深大断裂,为矿区内最大型断裂构造。北矿带发育5条断层(如图1),为压性逆断层,均有闪长玢岩脉和石英钠长斑岩脉侵入充填,属库布苏强应变构造带的次级构造脆-韧性剪切带,具挤压和右行剪切性质,控制着区内岩脉及矿体分布,对金矿化起重要作用(高怀忠等,2000)。南矿带发育3条近平行的断裂,与北矿带类似,均被闪长玢岩脉和石英钠长斑岩脉充填。

矿区内未见大规模侵入体,但中酸性岩脉极其发育,其分布均受库布苏主要断裂控制。库布苏金矿区北矿带的主要脉岩为闪长玢岩、次为石英钠长斑岩、细粒闪长岩、石英闪长玢岩等。

矿区内出露的闪长玢岩脉为主要赋矿岩石,侵位于托让格库都克组( $D_2t$ )中(图2),脉体走向为NWW,脉宽10m左右,长4 km。岩脉具超浅成特征,且岩石均发生了不同程度的蚀变,较新鲜闪长玢岩具斑状结构,斑晶为斜长石、石英、暗色矿物(主要为角闪石),基质为球粒结构。岩石破碎蚀变较强

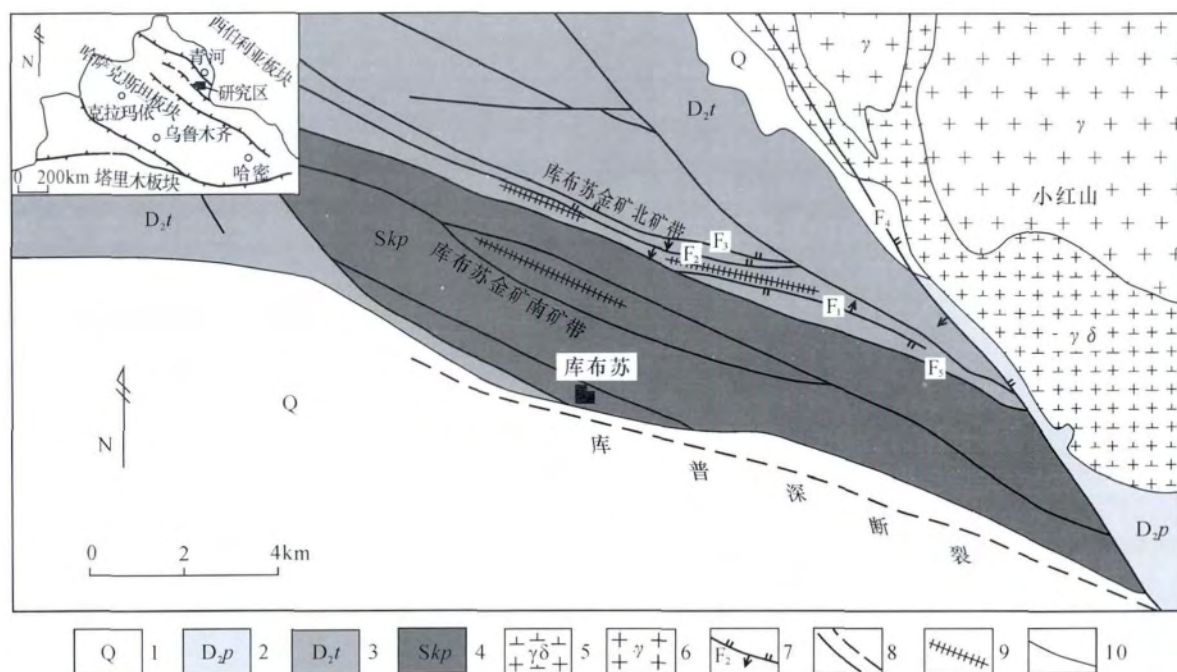


图1 青河县库布苏区金矿矿区地质图(据高怀忠等,1998修改)

Fig. 1 Geological map of the Kubusu gold mine in Qinghe county (modified from Gao et al., 1998)

1 - 第四系; 2 - 中泥盆统平顶山组; 3 - 中泥盆统托让格库都克组; 4 - 志留系库布苏群; 5 - 花岗闪长岩; 6 - 花岗岩; 7 - 逆断层及其编号; 8 - 性质不明断层和深断裂; 9 - 金矿化蚀变带; 10 - 地质界线

1 - Quaternary; 2 - Pingdingshan group of middle devonian; 3 - Tuoranggekuduke group of middle devonian; 4 - Kubusu group of Silurian; 5 - granodiorite; 6 - granite; 7 - thrust fault and its serial number; 8 - (deep) fault; 9 - mineralized alteration zone of gold;

10 - geological boundary

部分主要具硅化、绢云母化、毒砂-黄铁矿化,局部具绿泥石化、碳酸盐化和电气石化。

石英钠长斑岩脉,脉体走向 NWW,在矿化带附近多侵位于闪长玢岩脉两侧及内部(图 3),呈雁行斜列式分布,产状与闪长玢岩脉基本一致,脉宽几米,长数十米至数百米。岩石具斑状结构,斑晶为石英和钠长石,基质具霏细-微晶结构,由微细的长英质矿物组成。

王京彬等(2006)测得库布苏金矿闪长玢岩中单颗粒锆石 U-Pb 年龄为  $254.5 \pm 0.9$  Ma ~  $252.5 \pm 1.8$  Ma,即形成时代为二叠纪晚期。其它岩脉伴生或侵入于闪长玢岩脉或独立产出,均晚于闪长玢岩脉的形成时间。矿区附近唯一的岩体为北矿带东部的小红山(野马泉)岩基,是主要由花岗闪长岩、二长花岗岩和碱长花岗岩组成的复式花岗岩体。据甘林等(2010)测得小红山复式花岗岩体碱长花岗岩、二长花岗岩、花岗闪长岩成岩年龄的锆石 U-Pb 定年结果都为 ~300 Ma,认为 ~300 Ma 为野马泉复式花岗岩体成岩年龄,表明小红山花岗岩体与卡拉麦里富碱花岗岩带一样为海西中期晚石炭世东准噶尔地区后碰撞阶段花岗质岩浆作用产物。

库布苏北矿带位于  $F_1$ 、 $F_2$  断裂之间,为一宽约 30~60 m 的挤压破碎带,已发现 3 条含金矿脉(编号分别为①、②、③)(图 2)。破碎带中的托让格库都克组岩石普遍发育强烈的片理化,早期沿破碎带侵入的闪长玢岩、石英钠长斑岩及石英脉均遭受了多次强烈的挤压破碎。据高怀忠等(1998),在北矿带东段 800 m 的评价地段内地表圈定了 34 个脉状和透镜状矿体,主要产于闪长玢岩接触带及其内部破碎带中(图 3)。石英钠长斑岩中只有局部发育金矿化,一般不构成工业矿体。矿体产状与赋矿断裂近一致,断续出现,尖灭又再生,矿体长度一般在 10~40 m,厚 1~2 m,个别矿体长 140 m,厚达 6 m,金品位一般在  $1 \times 10^{-6}$  ~  $7 \times 10^{-6}$ ,富矿体平均品位为  $24 \times 10^{-6}$ ,属于破碎带蚀变岩型金矿(高怀忠等,1998)。矿石类型单一,主要矿化岩石为闪长玢岩,次为围岩接触带中片理化的角砾状和碎裂状粉砂质板岩、碳质凝灰岩、石英钠长斑岩等。矿化带内岩石蚀变强烈,主要是硅化、绢云母化、毒砂及磁黄铁矿化,其次为碳酸盐化、电气石化、绿泥石化(高怀忠等,1998)。金矿物为单一的自然金,并以裂隙金和晶隙金为主,其次以包体金的形式存在于黄铁矿、石英、毒砂及褐铁矿等矿物中。

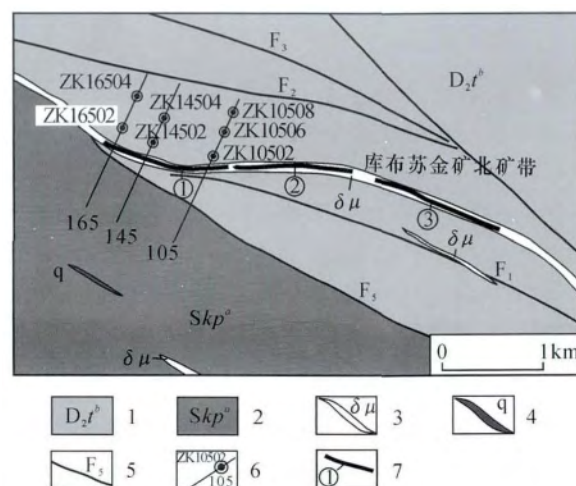


图 2 库布苏金矿北矿带矿区地质简图

(据武警黄金部队内部资料 2010 修改)

Fig. 2 Geological map of the northern belt of Kubusu gold deposit (modified from Chinese People's Gold Armed Police Force 2010)

1 - 中泥盆统托让格库都克组下亚组; 2 - 志留系库布苏群上亚组; 3 - 闪长玢岩脉; 4 - 石英脉; 5 - 断层及其编号; 6 - 勘探线、钻孔及编号; 7 - 矿脉及编号

1 - Lower subgroup of Tuoranglekuduke group in middle Devonian; 2 - Upper subgroup in Kubusu group of Silurian; 3 - Diorite porphyrite veins; 4 - Quartz vein; 5 - Fault and its serial number; 6 - Exploration line, drill hole and its serial number; 7 - Mineral vein and its serial numbers

## 2 样品采集与分析

样品采自库布苏金矿北矿带 1 号矿脉的 105、145、165 勘探线上的 ZK10502、ZK10506、ZK10508、ZK14502、ZK14504、ZK16502、ZK16504 等 7 个钻孔(见图 2)。元素质量迁移研究的样品采集为选择性采样,依据矿体产出位置,在钻孔中选出各岩性中典型的未见蚀变闪长玢岩 8 件、石英钠长斑岩 3 件、凝灰质砂岩 34 件、凝灰岩 5 件作为原岩,典型的蚀变(明显矿化)闪长玢岩 13 件、石英钠长斑岩 4 件、凝灰质砂岩 9 件、凝灰岩 4 件作为蚀变岩,其中蚀变凝灰质砂岩和蚀变凝灰岩样品采自接触带及其附近围岩。本研究将同类型的样品含量取平均值(统计数据见表 1),其计算结果代表整个研究区单位质量岩石中的质量迁移特征。围岩与岩脉中元素质量迁移和元素迁移量异常研究中,样品采自 105 勘探线剖面,采用全孔连续捡块方式,平均采样间距为 8 m,矿体或矿化强烈部位加密至 0.5~2 m。共采集钻孔岩心样品 202 件。

样品分析由中国地质科学院地球物理地球化学



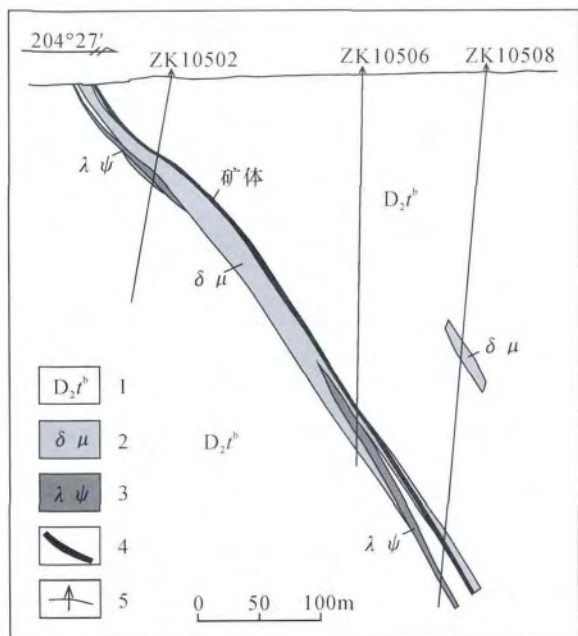


图3 库布苏金矿北矿带105勘探线剖面矿体及岩脉示意图

Fig. 3 Sketch of ore body and veins along exploration line 105 in the northern belt of Kubusu gold deposit

1 - 中泥盆统托让格库都克组下亚组; 2 - 闪长玢岩脉; 3 - 石英钠长斑岩脉; 4 - 矿体; 5 - 钻孔及编号

1 - Lower subgroup of Tuoranggekuduke group of middle devonian; 2 - Diorite porphyry veins; 3 - Quartz albite - porphyry veins; 4 - Ore body; 5 - drill hole and its serial number

勘查研究所中心实验室承担。其中 Au 采用无火焰原子吸收光谱法(AAN), Ag 采用发射光谱法(ES), As、Sb 采用原子荧光光谱法(HG-AFS), Bi、Cs、Mo、W、Y、La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu 采用等离子体质谱法(ICP-MS), SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、K<sub>2</sub>O、Ba、Rb、S 采用压片法 X-射线荧光光谱法(XRF), MgO、Na<sub>2</sub>O、Cu、Li、Sr 采用等离子体光谱法(ICP-OES)进行测试。质量监控结果表明 样品分析质量满足研究要求。

### 3 元素质量迁移规律

在地球化学开放系统中,围岩或岩体中的元素在成矿流体热液作用下会发生带入和带出现象,使原地质体系的岩石质量发生变化,即岩石中元素发生质量迁移,可通过质量平衡计算进行研究(Brauhart et al., 2001; 马生明等, 2009; 郑远川等, 2010; 王睿等, 2010; 艾金彪等, 2013)。本文选用 Grant 法计算元素的迁移量和迁移率,并在此基础上探讨成矿过程中金及其伴生元素元素的富集沉淀和

一些贫化元素的迁移带出引起的质量迁移特征。

Grant 方程计算公式为

$$\Delta C_i = (C_j^0 / C_j^A) C_i^A - C_i^0 \quad (1)$$

其中  $C_i^0$ 、 $C_i^A$  为原岩和蚀变岩中活动元素  $i$  的浓度,  $C_j^0$ 、 $C_j^A$  分别为原岩和蚀变岩中惰性元素  $j$  的浓度,  $\Delta C_i$  为元素  $i$  的质量变化。当  $\Delta C_i > 0$  时,表示元素在蚀变过程中带入;  $\Delta C_i < 0$  时,则带出。前人研究表明, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub> 在矿床围岩蚀变过程中作为惰性元素具有普遍意义(魏俊浩等, 2000)。本文选 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 作为惰性元素。

#### 3.1 元素活动特征

依据表1中的统计数据及公式(1),计算出研究区主要类型岩石,包括蚀变闪长玢岩、蚀变石英钠长斑岩、蚀变凝灰质砂岩和蚀变凝灰岩中元素的迁移量( $\Delta C_i$ )、质量变化率( $\Delta C_i / C_i^0$ )如表2所示,其中元素迁移量( $\Delta C_i$ )为正值时,表示该元素发生带入作用;为负值时表示该元素发生带出作用。表1中数据为钻孔中不同类型蚀变岩和及其原岩中元素含量的平均值。

根据表2中元素质量迁移计算结果和图4,可以看出库布苏北矿区不同类型原岩-蚀变岩中各元素质量变化百分率( $\Delta C_i / C_i^0$ ),即表征元素发生带入带出程度的强弱。在闪长玢岩中成矿元素和伴生元素均为带入特征,其迁移程度为 Au > As > Bi > Ag > Sb; 发生带入的微量元素迁移程度为 Y > S > Rb > Cs > Mo > W,带出的微量元素迁移程度为 Sr > Ba > Cu > Li; 发生带入的稀土元素迁移程度为 Dy > Er > Ce > Eu > Nd > Yb > Ho > Tb > Gd > Lu,带出的稀土元素迁移程度为 Sm > La > Pr > Tm; 发生带入的主量元素迁移程度为 K<sub>2</sub>O > SiO<sub>2</sub>,带出的主量元素迁移程度为 MgO > Na<sub>2</sub>O > Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> > CaO。

在石英钠长斑岩中发生带入的成矿元素和伴生元素迁移程度为 Au > Sb > Ag > As,带出的元素只有 Bi 程度微弱;发生带入的微量元素迁移程度为 Mo > W > Rb > Cs > S > Li > Cu > Ba,带出的微量元素迁移程度为 Sr > Y; 发生带入的稀土元素迁移程度为 La > Eu > Er > Pr > Ce > Nd > Sm > Dy > Tm,带出的稀土元素迁移程度为 Tb > Ho > Gd > Yb > Lu; 发生带入的主量元素迁移程度为 K<sub>2</sub>O > Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,带出的主量元素迁移程度为 CaO > Na<sub>2</sub>O > MgO > SiO<sub>2</sub>。

在凝灰质砂岩中成矿元素和伴生元素均为带入特征,其迁移程度为 Au > As > Bi > Ag > Sb; 发生带入的微量元素迁移程度为 W > Rb > Cs > S > Y > Mo > Li,带出的微量元素迁移程度为 Sr > Ba > Cu; 发

表 1 库布苏金矿主要类型岩石中元素平均含量统计表

Table 3 Statistics of average contents of elements for main rocks from the Kubusu gold deposit

岩性	闪长玢岩 ( <i>n</i> = 8)	蚀变闪长 玢岩( <i>n</i> = 13)	石英钠长 斑岩( <i>n</i> = 3)	蚀变石英钠 长斑岩( <i>n</i> = 4)	凝灰质砂 岩( <i>n</i> = 34)	蚀变凝灰质 砂岩( <i>n</i> = 9)	凝灰岩( <i>n</i> = 5)	蚀变凝灰 岩( <i>n</i> = 4)
Au	2.8	1044.02	3.71	866.75	2.61	823.15	2.82	243.24
Ag	57.08	161.41	170.01	267.62	46.71	124.81	53.9	99.42
As	14.81	131.26	215.84	305.24	13.18	269.79	10.08	155.38
Bi	0.19	0.68	1.49	1.69	0.11	0.36	0.13	0.44
Sb	0.59	1.27	0.29	0.75	1.05	1.28	0.57	1.26
Cs	3.99	5.52	1.78	3.32	2.77	5.91	2.9	7.07
Cu	36.16	23.89	7.59	10.75	51.89	44.95	38.28	38.62
Li	29.46	21.97	4.88	7.53	31.83	34.17	28.96	30.3
Mo	1.02	1.19	0.25	0.97	1.31	1.67	1.11	1.54
W	2.35	2.66	0.6	1.9	0.78	3.91	1.03	3.24
Ba	690.51	447.15	225.77	282.3	719.11	616.4	621.96	513.53
Rb	57.28	134.13	66.93	130.28	37.28	102.28	56.92	91.6
S	438.43	1087.35	646.27	1121.73	625.42	1042.68	736.9	1313.88
Sr	467.2	215.33	214.3	123.48	473.59	395.54	414.96	460.68
Y	18.99	60.01	292.93	214.12	22.45	29.09	25.87	26.82
La	16.52	28.89	3.73	7.93	14.48	19.83	18.85	19.23
Ce	32.83	57.65	8.87	17.98	29.07	39.78	38.03	40.02
Pr	4.38	7.54	1.7	2.65	4.34	5.38	5.2	5.17
Nd	17.43	29.75	7.79	11.39	17.89	21.39	20.94	20.37
Sm	3.86	6.8	6.34	5.94	4.19	4.83	4.7	4.58
Eu	1.01	0.86	0.15	0.16	1.28	1.11	1.29	1.09
Gd	3.53	6.99	11.96	10.33	3.98	4.65	4.5	4.47
Tb	0.58	1.34	3.49	2.94	0.68	0.82	0.76	0.77
Dy	3.36	8.53	29.42	23.16	4.01	4.92	4.55	4.62
Ho	0.69	1.86	6.74	5.5	0.83	1.03	0.92	0.96
Er	1.99	5.57	21.4	17.33	2.35	2.99	2.59	2.75
Tm	0.33	0.99	4	3.23	0.38	0.51	0.42	0.47
Yb	2.08	6.45	26.17	21.27	2.29	3.26	2.55	3.02
Lu	0.34	1.04	4.22	3.33	0.35	0.54	0.4	0.51
SiO <sub>2</sub>	61.58	70.86	72.16	75.39	56.68	64	62.82	61.9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.75	15.47	12.88	15.13	14.44	15.02	14.52	14.36
TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.58	2.8	0.95	1.16	7.23	4.35	5.13	4.63
MgO	1.78	0.44	0.2	0.14	3.17	1.34	1.44	1.28
CaO	3.65	2.52	2.88	1.27	4.58	3.9	3.69	5.26
Na <sub>2</sub> O	3.57	1.13	4.89	2.8	2.89	2.13	3.21	2.09
K <sub>2</sub> O	2.14	3.85	1.65	3.05	1.82	3.25	2.48	3

注: 元素含量单位: Au、Ag -  $\times 10^{-9}$ , 常量元素 - %, 其余元素 -  $\times 10^{-6}$ ; *n*: 参加统计样品数。

生带入的稀土元素迁移程度为 Dy > Ce > Er > Nd > Lu > Yb > Eu > La > Pr, 带出的稀土元素迁移程度为

Gd > Tm > Tb > Ho > Sm; 发生带入的主量元素迁移程度为 K<sub>2</sub>O > SiO<sub>2</sub>, 带出的主量元素迁移程度为

$\text{MgO} > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{Na}_2\text{O} > \text{CaO}$ 。

在凝灰岩中成矿元素和伴生元素均为带入特征, 其迁移程度为  $\text{Au} > \text{As} > \text{Bi} > \text{Sb} > \text{Ag}$ ; 微量元素除 Ba 为带出特征, 其余均发生带入, 迁移程度为  $\text{W} > \text{Cs} > \text{S} > \text{Rb} > \text{Mo} > \text{Sr} > \text{Li} > \text{Y} > \text{Cu}$ ; 发生带入的稀土元素迁移程度为  $\text{Eu} > \text{Yb} > \text{Lu} > \text{Ce} > \text{Nd} > \text{Dy} > \text{La} > \text{Pr}$ , 带出

的稀土元素迁移程度为  $\text{Er} > \text{Gd} > \text{Tm} > \text{Sm} > \text{Ho} > \text{Tb}$ ; 发生带入的主量元素迁移程度为  $\text{CaO} > \text{K}_2\text{O}$ , 带出的主量元素迁移程度为  $\text{Na}_2\text{O} > \text{MgO} > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{SiO}_2$ 。

### 3.2 元素质量迁移规律及其意义

3.2.1 成矿元素、主量元素和微量元素的质量迁移  
从图4和表2中可看出, 库布苏北矿带发生了

表2 库布苏金矿矿化蚀变岩石中元素质量迁移计算结果

Table 2 Calculated results of major and trace element migration in altered wall rocks in the Kubusu gold deposit

元素	蚀变闪长玢岩		蚀变石英钠长斑岩		蚀变凝灰质砂岩		蚀变凝灰岩	
	$\Delta C_i$	$\Delta C_i/C_i^0$	$\Delta C_i$	$\Delta C_i/C_i^0$	$\Delta C_i$	$\Delta C_i/C_i^0$	$\Delta C_i$	$\Delta C_i/C_i^0$
Au	992.63	35451.06	734.14	19788.26	788.75	30220.46	243.13	8621.64
Ag	96.82	169.62	57.81	34.01	73.28	156.88	46.63	86.51
As	110.34	745.04	44.01	20.39	246.19	1867.92	147.03	1458.64
Bi	0.46	241.24	-0.05	-3.44	0.24	214.64	0.31	242.23
Sb	0.62	105.24	0.35	120.16	0.18	17.2	0.7	123.52
Cs	1.27	31.91	1.05	58.78	2.91	105.12	4.25	146.51
Cu	-13.38	-37.01	1.56	20.57	-8.68	-16.72	0.77	2.01
Li	-8.51	-28.9	1.53	31.36	1.02	3.21	1.68	5.79
Mo	0.11	11.24	0.58	230.3	0.3	22.56	0.45	40.28
W	0.19	7.92	1.02	169.57	2.98	381.92	2.25	218.07
Ba	-264.17	-38.26	14.55	6.44	-126.51	-17.59	-102.71	-16.51
Rb	70.61	123.27	43.98	65.7	61.05	163.76	35.7	62.72
S	598.31	136.47	308.65	47.76	377	60.28	591.62	80.28
Sr	-261.89	-56.06	-109.18	-50.95	-93.32	-19.71	50.85	12.25
Y	38.23	201.3	-110.65	-37.77	5.52	24.57	1.25	4.83
La	11.03	66.74	3.02	80.98	4.58	31.66	0.59	3.15
Ce	22.14	67.43	6.44	72.56	9.17	31.56	2.44	6.41
Pr	2.81	64.13	0.56	32.70	0.83	19.18	0.03	0.53
Nd	10.94	62.74	1.91	24.47	2.67	14.95	-0.34	-1.64
Sm	2.62	67.97	-1.28	-20.24	0.45	10.82	-0.07	-1.47
Eu	-0.19	-18.81	-0.01	-9.20	-0.21	-16.63	-0.19	-14.56
Gd	3.13	88.80	-3.17	-26.47	0.49	12.32	0.02	0.44
Tb	0.70	120.28	-0.99	-28.29	0.11	15.93	0.02	2.44
Dy	4.77	142.05	-9.70	-32.98	0.72	17.96	0.12	2.67
Ho	1.08	157.02	-2.06	-30.53	0.16	19.30	0.05	5.51
Er	3.32	166.87	-6.65	-31.06	0.52	22.32	0.19	7.36
Tm	0.61	186.04	-1.25	-31.26	0.11	29.03	0.06	13.15
Yb	4.07	195.66	-8.06	-30.81	0.84	36.86	0.50	19.75
Lu	0.65	191.65	-1.39	-32.82	0.17	48.33	0.12	28.92
$\text{SiO}_2$	5.98	9.71	-7.98	-11.06	4.85	8.55	-0.23	-0.37
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	-1.91	-41.71	0.04	3.95	-3.05	-42.16	-0.45	-8.74
MgO	-1.36	-76.43	-0.08	-40.41	-1.88	-59.36	-0.15	-10.12
CaO	-1.25	-34.17	-1.8	-62.46	-0.83	-18.14	1.63	44.14
$\text{Na}_2\text{O}$	-2.49	-69.82	-2.51	-51.26	-0.84	-29.14	-1.1	-34.17
$\text{K}_2\text{O}$	1.53	71.53	0.95	57.36	1.3	71.68	0.55	22.32

注:  $\Delta C_i$  单位: Au、Ag - mg/t, 其余微量元素 - g/t, 常量元素 - kg/t;  $\Delta C_i/C_i^0$  - %。

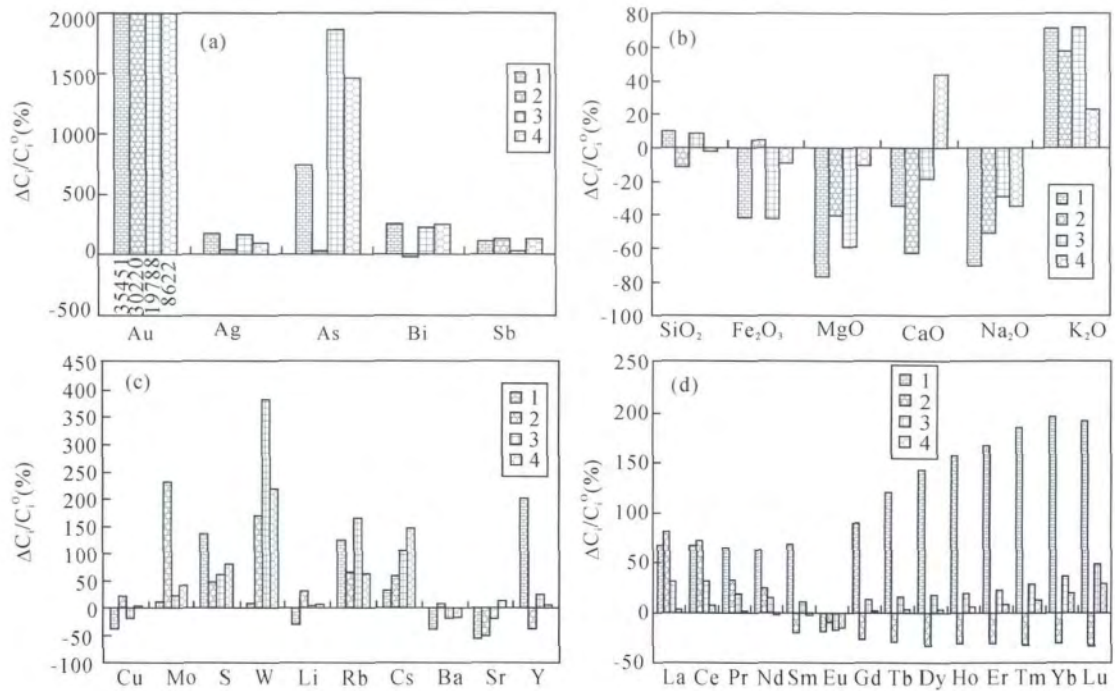


图4 库布苏金矿蚀变岩中元素质量迁移对比图

Fig. 4 Comparison histograms showing gain and loss of elements in altered rocks of the Kubusu gold deposit

(a) - 成矿及伴生元素; (b) - 主量元素; (c) - 微量元素; (d) - 稀土元素; 1 - 蚀变闪长玢岩; 2 - 蚀变石英钠长斑岩; 3 - 蚀变凝灰质砂岩; 4 - 蚀变凝灰岩  
(a) - metallogenic and associated elements; (b) - major elements; (c) - trace elements; (d) - rare earth elements; 1 - Altered diorite porphyrite; 2 - Altered quartz albite porphyry; 3 - Altered tuffaceous sandstone; 4 - Altered tuff

矿化蚀变的岩脉和接触带围岩中各元素的质量迁移情况如下,成矿元素和伴生元素 Au、As 在岩脉和围岩中质量变化百分率均很大,带入量也很显著,其中成矿元素 Au 在闪长玢岩脉中质量变化最为显著,质量变化率为 35451.06%,在凝灰岩中质量变化较小,表明闪长玢岩脉为主要赋矿岩脉; As 则在闪长玢岩脉和接触带围岩中质量变化率较大,为 745.04% ~ 1867.92%,这与赋矿岩脉中普遍的毒砂化有关; Ag 在各岩性中的质量变化率虽然很小,但其与 Au 的变化趋势一致,显示 Au 和 Ag 的密切伴生关系;而 Bi 只在石英钠长斑岩脉中质量变化率很小,有微弱带出,但闪长玢岩脉和接触围岩中则显著带入; Sb 的质量变化率大小与 Ag 相当。

图 4b 中,主量元素中 SiO<sub>2</sub> 在闪长玢岩脉和凝灰质砂岩中质量变化率分别为 9.71%、8.55%,带入明显;但在酸性的石英钠长斑岩脉中带出显著,质量变化率达到 11.06%。Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在闪长玢岩脉和凝灰质砂岩中明显带出,质量变化率为 41.71% 和 42.16%,在石英钠长斑岩脉中微弱带入。MgO 和 Na<sub>2</sub>O 在岩脉和接触带围岩中均明显带出,质量变化

率分别为 10.12% ~ 76.43% 和 29.14% ~ 69.82%,可以看出其带出量均较大。CaO 在岩脉和凝灰质砂岩中明显带出,质量变化率与 MgO、Na<sub>2</sub>O 的质量变化率相当,而在凝灰岩中则明显带入。K<sub>2</sub>O 在岩脉和接触带围岩中质量变化率为 22.32% ~ 71.68%,均明显带入。

以上主量元素的带入带出特征分析如下,成矿作用中热液将 Si 从石英钠长斑岩脉中淋滤出来,并迁移至闪长玢岩脉和接触带围岩中,发生强烈的硅化或形成石英脉,与野外现象一致。Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 是全铁,包括 Fe<sup>2+</sup> 和 Fe<sup>3+</sup>,虽然不知道 Fe<sup>2+</sup> 和 Fe<sup>3+</sup> 的各自带入带出情况,但根据其在闪长玢岩脉中明显带出,在石英钠长斑岩脉中微弱带入特征,可以表明,受热液流体作用,闪长玢岩中的黑云母和角闪石等暗色矿物发生绿泥石化、绿帘石化,再加上斜长石的绢云母化,则会产生石英和黄铁矿,使 Fe 带出。MgO、Na<sub>2</sub>O 的带出可能由于岩脉及接触带围岩发生的黑云母、角闪石的绿泥石化、斜长石的钾长石化,而发生去 Mg、Na 作用。CaO 的带出可能与斜长石的分解有关,其在凝灰岩中则明显带入,可能是由于碳酸

盐化的原因。 $K_2O$ 的带入应是由于矿化带的强烈钾长石化,结果与实际相符。

图4c中,微量元素在岩脉和接触带围岩中均显著带入的为W、Mo、Rb、S、Cs,质量变化率分别为7.92%~381.92%、11.24%~230.3%、62.72%~163.76%、47.76%~591.62%、31.91%~146.51%。Ba在闪长玢岩脉和围岩中显著带出,质量变化率为16.51%~38.26%,在石英钠长斑岩脉中则微弱带入。Sr在凝灰岩中明显带入,在岩脉和凝灰质砂岩中则显著带出,质量变化率为19.71%~56.06%。矿化剂S的显著带入主要是由于热液流体中携带大量S,最后形成硫化物沉淀下来;Rb、Cs的带入,可能是由于其地球化学性状与K密切相关,而与K离子发生类质同象代替;Sr和Ca的迁移规律一致,可看出其具有明显相关性,可能同样与斜长石的裂解有关。

### 3.2.2 稀土元素的质量迁移

在热液成矿过程中稀土元素活动性会受水岩反应、流体中物质的卸载和沉淀、流体的温度、压力、Ph、Eh等因素的影响(Lottermoser, 1992)。并且稀土元素具有化学性质相近、离子半径相近的特征,在地质过程中常作为一个整体活动(赵振华, 1978),而从图4d中稀土元素的迁移规律来看,不同岩性的稀土元素都是作为一个整体参与了成矿过程,只是规律各有不同。

赋矿主岩闪长玢岩脉的LREE迁移特点为除Eu为少量带出外,La~Sm均明显带入,Eu的质量变化率为18.81%,La~Sm的质量变化率为62.74%~67.97%,相差不大;HREE的迁移特点为Gd~Lu整体表现为显著带入,其质量变化率为120.28%~195.66%,且呈逐步递增变化趋势。

石英钠长斑岩脉的LREE迁移特点为La~Nd表现为明显带入,质量变化率为80.98%~24.47%,呈逐步递减趋势,而Sm和Eu均表现出少量带出特征,质量变化率分别为20.24%和9.2%;HREE的迁移特点为Gd~Lu整体表现为明显带出特征,其质量变化率为26.47%~32.98%,基本上呈递增变化趋势。

接触带凝灰质砂岩的LREE迁移特点与赋矿主岩闪长玢岩脉相似,同样是Eu有少量带出,但La~Sm的带入量相比闪长玢岩脉少很多,Eu的质量变化率为16.63%,La~Sm的质量变化率为10.82%~31.66%,呈递减趋势;HREE的迁移特点为Gd~Lu整体表现为少量带入,其质量变化率为12.32%

~48.33%,呈逐步递增趋势,但闪长玢岩脉的HREE带入程度是其4~8倍。

接触带凝灰岩的LREE迁移特点与前述均有不同,La~Pr表现为微弱带入特征,质量变化率为0.53%~6.41%,Nd~Eu表现出微弱到少量的带出特征,质量变化率为1.47%~14.56%;HREE的迁移特点与闪长玢岩脉和凝灰质砂岩相同,但迁移程度基本上不及凝灰质砂岩的一半,Gd~Lu整体均表现为微弱到少量的带出特征,其质量变化率为0.44%~28.92%,呈递增变化趋势。

表3列出了不同类型岩石稀土元素的特征参数,图5为不同类型岩石稀土元素配分曲线图。据图表可知赋矿闪长玢岩脉的球粒陨石标准化配分曲线为LREE相对富集,REE配分曲线明显右倾形式,其蚀变闪长玢岩的 $\Sigma REE$ 比未蚀变岩增加近2倍,其中LREE、HREE均增加近2倍;新鲜和蚀变闪长玢岩的 $(La/Yb)_N$ 分别为5.35、3.02、 $(La/Sm)_N$ 分别为2.69、2.67、 $(Gd/Lu)_N$ 分别为1.17、0.76,表明蚀变前后的轻重稀土均分馏明显,LREE分馏程度较高,HREE分馏程度不明显;新鲜和蚀变闪长玢岩的 $\delta Eu$ 为0.82和0.38, $\delta Ce$ 为0.91和0.92,表明蚀变后的闪长玢岩Eu负异常更加强烈,也说明热液流体本身就表现为Eu负异常,Ce负异常程度无变化。

前人研究表明,Eu异常可以反映地质环境的氧化还原程度和温度条件,在相对氧化的条件下溶液中钕主要以 $Eu^{3+}$ 价态存在(Sverjensky, 1984; Michael, 1991),且 $Eu^{3+}$ 和其他 $REE^{3+}$ 元素同样优先进入矿物晶格(Wass *et al.*, 1980);而在较高温度和还原的环境下溶液中钕主要以 $Eu^{2+}$ 价态存在(Sverjensky, 1984; Michael, 1991),值得注意的是,Eu异常的形成常常与 $Eu^{2+}$ 密切相关,离子半径大的 $Eu^{2+}$ 与其他 $REE^{3+}$ 元素的化学活动性质不一致,便会导致 $Eu^{2+}$ 与稀土元素整个体系分离,会选择在热液(除了斜长石)中富集,从而在其原来承载介质(矿物)中形成Eu负异常(Eby, 1975; Puchelt *et al.*, 1976; 王立强等, 2012),再者闪长玢岩中的斜长石分解也会导致 $Eu^{2+}$ 从矿物晶格中分离出来形成Eu负异常。因此由蚀变闪长玢岩的强烈Eu负异常,可知库布苏金矿床成矿流体条件应为较高温度和还原环境,与前人研究结果一致(高怀忠等, 2000)。

石英钠长斑岩脉的球粒陨石标准化配分曲线为HREE相对富集,轻重稀土分馏程度高,REE配分曲线明显左倾,与闪长玢岩脉REE配分模式完全不同,从许多介绍东准噶尔地区后碰撞造山作用



表 3 库布苏金矿主要类型岩石中稀土元素特征参数

Table 3 Characteristic parameters of rare earth elements of main rocks from the Kubusu gold deposit

岩性	$\Sigma\text{REE}$	LREE	HREE	LREE/HREE	$(\text{La}/\text{Yb})_N$	$(\text{La}/\text{Sm})_N$	$(\text{Gd}/\text{Lu})_N$	$\delta\text{Eu}$	$\delta\text{Ce}$
闪长玢岩	88.93	76.03	12.9	5.89	5.35	2.69	1.17	0.82	0.91
蚀变闪长玢岩	164.26	131.49	32.77	4.01	3.02	2.67	0.76	0.38	0.92
石英钠长斑岩	135.98	28.58	107.4	0.27	0.1	0.37	0.32	0.05	0.85
蚀变石英钠长斑岩	133.14	46.05	87.09	0.53	0.25	0.84	0.35	0.06	0.94
凝灰质砂岩	86.12	71.25	14.87	4.79	4.26	2.17	1.28	0.95	0.87
蚀变凝灰质砂岩	111.04	92.32	18.72	4.93	4.1	2.58	0.97	0.71	0.91
凝灰岩	105.7	89.01	16.69	5.33	4.98	2.52	1.27	0.85	0.91
蚀变凝灰岩	108.03	90.46	17.57	5.15	4.29	2.64	0.99	0.73	0.95

注: REE 特征参数计算数据源自表 1。

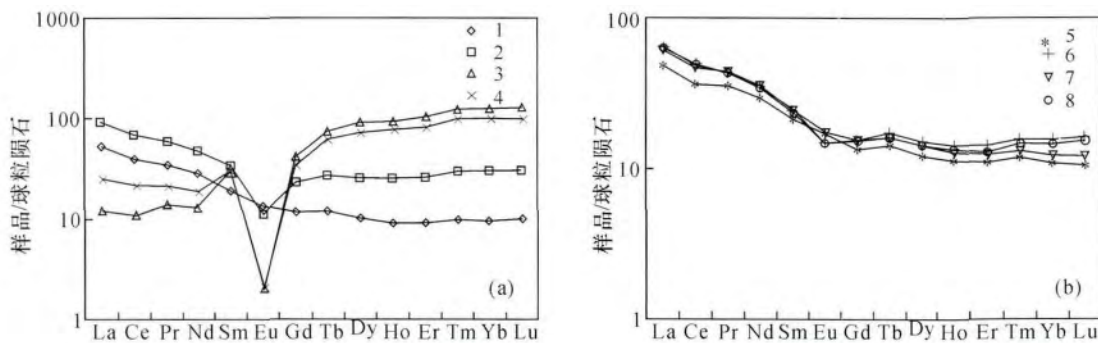


图 5 库布苏金矿脉岩与围岩稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(球粒陨石标准化值引自 Boynton, 1984)

Fig. 5 Chondrite - normalized REE patterns of dykes and surrounding rocks from Kubusu gold deposit (chondrite data from Boynton, 1984)

(a) - 脉岩; (b) - 围岩; 1 - 闪长玢岩; 2 - 蚀变闪长玢岩; 3 - 石英钠长斑岩; 4 - 蚀变石英钠长斑岩; 5 - 凝灰质砂岩; 6 - 蚀变凝灰质砂岩; 7 - 凝灰岩; 8 - 蚀变凝灰岩

(a) - Dykes; (b) - Surrounding rocks; 1 - Diorite porphyry; 2 - Altered diorite porphyry; 3 - Quartz albite - porphyry; 4 - Altered quartz albite-porphyry; 5 - Tuffaceous sandstone; 6 - Altered tuffaceous sandstone; 7 - Tuff; 8 - Altered tuff

(时间约为晚石炭世到早二叠世)产生的花岗岩类成因文献中,其均为右倾模式(刘家远等,1999;杨高学等,2009;甘林等,2010)。但石英钠长斑岩脉的 REE 分布曲线严重左倾,说明二者为两期不同岩浆体系的演化产物。新鲜石英钠长斑岩与蚀变岩的  $\Sigma\text{REE}$  近相等, LREE/HREE 值分别为 0.27 和 0.53,  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  分别为 0.1 和 0.25,  $(\text{La}/\text{Sm})_N$  分别为 0.37 和 0.84,  $(\text{Gd}/\text{Lu})_N$  分别为 0.32 和 0.35, 表明蚀变后 REE 总量未变,但 LREE 有所增加, HREE 则有所减少,蚀变后的轻重稀土分馏程度明显减弱,而蚀变后的 LREE 较 HREE 变化程度明显,但分馏不明显;新鲜石英钠长斑岩和蚀变岩的  $\delta\text{Eu}$  为 0.05 和 0.06,  $\delta\text{Ce}$  为 0.85 和 0.94, Eu 负异常非常强烈,以上可能说明石英钠长斑岩的母体岩浆来自于深部的地幔与地壳重熔岩浆(赵振华,1978;1989)。

但接触带围岩中凝灰质砂岩和凝灰岩蚀变前后

的稀土元素配分曲线均为 LREE 相对富集,配分曲线明显右倾形式,它们的  $\Sigma\text{REE}$  为  $86.12 \times 10^{-6} \sim 111.04 \times 10^{-6}$ , LREE/HREE 比值为 4.79 ~ 5.33,  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  为 4.1 ~ 4.98,  $(\text{La}/\text{Sm})_N$  为 2.17 ~ 2.64,  $(\text{Gd}/\text{Lu})_N$  为 0.97 ~ 1.28, 表明蚀变前后它们的轻重稀土均分馏明显, LREE 分馏程度较高, HREE 分馏程度不明显;  $\delta\text{Eu}$  为 0.71 ~ 0.95,  $\delta\text{Ce}$  为 0.87 ~ 0.95, 表明蚀变前后接触带围岩为 Eu 和 Ce 弱负异常,说明热液流体的活动对接触带围岩甚至外围围岩的影响有限。

成矿热液流体的稀土元素特征控制着蚀变岩的稀土元素特征和分配形式。因此,从以上规律分析可看出,库布苏金矿床受到了强烈的热液成矿活动影响,岩脉均受到了较强的热液活动和后期改造,继承了成矿流体的稀土元素特征,使稀土元素整体发生了较大规模的带入和带出,尤其是赋矿的闪长玢

岩脉,带入带出规模最大。但接触带围岩凝灰质砂岩和凝灰岩的稀土元素受到的热液活动影响较小。

#### 4 围岩与脉岩中元素质量迁移

库布苏金矿床主要受热液成矿作用影响,为进一步理解库布苏金矿床的成矿机制,笔者从质量迁移理论入手,针对剖面中的岩脉及其围岩,更宏观的讨论其质量迁移情况,以研究成矿热液对岩脉及其围岩的影响范围和带出元素对成矿元素的影响。这里,根据库布苏金矿北矿带105勘探线ZK10502、ZK10506、ZK10508钻孔中202件样品分析数据,按钻孔计算每个样品的元素迁移量,其中参加计算的元素主要选择显著带入的成矿元素Au、伴生元素As、Bi、Ag、Sb、微量元素W和显著带出的主量元素MgO、Na<sub>2</sub>O、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。计算过程及原始数据略,结果以元素迁移地球化学异常图形式展现(见图6),图3为库布苏金矿北矿带105勘探线剖面中矿体-岩脉-围岩相对位置示意图。

从图6中可看出,当Au带入量大于10mg/t,Ag带入量大于25mg/t,As带入量大于10g/t,W带入量大于0.4g/t时,元素的迁移沉淀场所基本在岩脉与围岩的接触带附近,外围围岩中仅有零星带入,可见元素带入受破碎的岩脉控制明显,说明成矿元素Au及伴生元素Ag、As主要是随成矿流体沿着由后期应变剪切作用形成的闪长玢岩脉破碎系统或围岩与岩脉之间的构造裂隙上升迁移沉淀,最后Au主要以自然金形式存在于毒砂-黄铁矿、石英等矿物的裂隙和晶隙中。Au、As、W的迁移程度大,但迁移范围小。当Sb的带入量大于0.25g/t,Bi的带入量大于0.08g/t时,发生带入的沉淀场所则分布在岩脉和接触带附近围岩中,Sb主要迁移到岩脉和岩脉的上盘围岩,Bi主要迁移到岩脉和岩脉的上、下盘围岩中。Sb、Bi都在围岩中有一定程度的带入,与Au、As、W迁移情况不同,Sb、Bi虽然迁移程度较小,但迁移范围很大,说明As、W、Sb、Bi可以作为成矿指示元素。

当MgO的带出量大于5kg/t时,带出边界在岩脉附近的围岩中;而当Na<sub>2</sub>O的带出量大于5kg/t时,其带出范围比MgO大的很多,Na<sub>2</sub>O的带出几乎发生在岩脉及全部围岩中,但带出程度最高的位置几乎只限定在岩脉中,这可能说明带出程度最高的位置与带出程度相对较弱的位置受到的是性质不同的热液作用,而上文及前人研究结果表明,库布苏金矿床赋矿闪长玢岩脉主要受到了来自深源的岩浆热

液作用成矿(王京彬等,2006),因此,说明岩脉中Na<sub>2</sub>O、MgO的强烈带出是受到岩浆热液的作用;而由于库布苏金矿区位于东准噶尔库布苏强应变构造带,地层围岩主要是志留系库布苏群(*Skp*)沉积变质岩和中泥盆统托让格库都克组(*D<sub>2</sub>t*)沉积变质岩(高怀忠等,1996,2000),充分说明围岩中Na<sub>2</sub>O、MgO的明显带出可能是受到区域变质作用(应变剪切作用)的影响,在原岩变质过程中,发生脱水作用,使原矿物中的Mg、Na也随之带出,而且变质热液对围岩产生大规模、广泛的变质作用也符合地质事实。这表明Mg、Na也可以作为成矿指示元素。

#### 5 结论

本文根据库布苏金矿床北矿带蚀变和新鲜岩脉及围岩的质量平衡研究,按岩脉和围岩的岩性,分别探讨了成矿元素、主量元素、微量元素和稀土元素的质量迁移规律,查明了库布苏金矿成矿过程中元素的活动性和迁移规律,并结合元素迁移地球化学图、稀土元素特征,讨论了成矿热液流体的作用范围和程度,进一步研究了库布苏金矿床的热液来源问题,结果表明:

(1) 库布苏金矿赋矿闪长玢岩脉和其它岩脉及围岩的元素均发生了程度不一的带入和带出作用。质量迁移计算结果表明,从接触带围岩到赋矿闪长玢岩脉,发生明显带入有成矿伴生元素Au、As、Bi、Ag、Sb,主量元素K<sub>2</sub>O、SiO<sub>2</sub>,说明引起闪长玢岩脉和接触带围岩蚀变的流体中富含Au、As等成矿及伴生元素和K<sub>2</sub>O、SiO<sub>2</sub>等主成分,导致这些带入元素向矿体迁移富集;发生明显带出的有微量元素Ba、Sr、Cu,主量元素MgO、Na<sub>2</sub>O、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO,说明微量元素Ba、Sr等和主量元素MgO、Na<sub>2</sub>O等受热液蚀变作用,被交代、淋滤出原岩,随流体迁出。

(2) 库布苏金矿赋矿闪长玢岩脉和石英钠长斑岩脉的稀土元素整体质量变化显著,发生明显的带入和带出,岩脉蚀变前后的轻重稀土分馏均明显,但相比原岩,蚀变后岩脉的轻重稀土分馏程度有减小趋势。接触带围岩的稀土元素整体质量变化不大,说明成矿流体对岩脉的蚀变程度很大,且对减轻轻重稀土元素分馏程度有一定作用,但对围岩的影响有限。赋矿闪长玢岩脉稀土元素配分曲线右倾,轻稀土富集,轻重稀土分馏明显,Eu强烈负异常,Ce弱负异常,说明库布苏金矿成矿流体条件应为较高温度和还原环境。

(3) 围岩与脉岩中元素的迁移程度和迁移范围

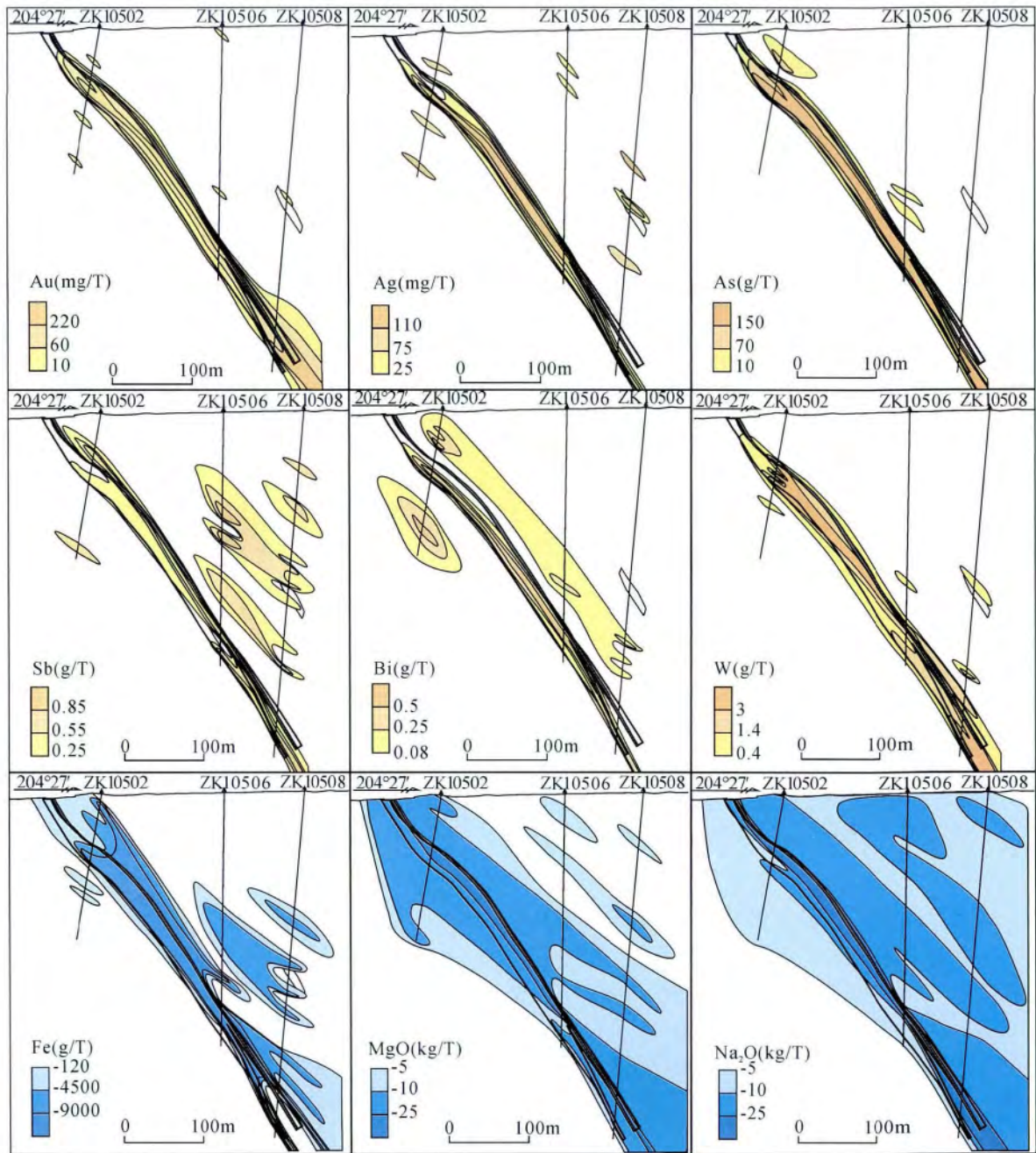


图6 库布苏金矿北矿带105勘探线剖面元素迁移地球化学异常图

Fig. 6 Profiles showing geochemical anomalies of elements mass transfer along exploration line 105 of the northern belt of Kubusu gold deposit

各异,受岩浆热液作用,带入的成矿及伴生元素 Au、As 的迁移程度大,但迁移范围小;Sb、Bi 迁移程度较小,但迁移范围很大;Na<sub>2</sub>O、MgO 明显带出,迁移范围广,围岩可能受到变质热液的影响。因此可能说明库布苏金矿受到了岩浆热液和变质热液的共同作用而成矿。特征元素可以作为成矿指示元素,带入的成矿指示元素有 As、W、Sb、Bi,带出的成矿指示元素有 Mg、Na。

342

#### [References]

- Ai Jin-biao, Ma Sheng-ming, Zhu Li-xin, Xi Ming-jie, Fan Lian-jie, Hu Zhao-xin, Zhang Yan. 2013. Major elements migration regularity and mass change quantification of alteration zones in Matou porphyry Mo - Cu deposit, Anhui Province [J]. Mineral Deposits, 32 ( 6 ) : 1262 - 1274 ( in Chinese with English abstract )
- Brauhart C W, Huston D L, Groves D I, Mikucki E J, Gardoll S J. 2001. Geochemical mass-transfer patterns as indicators of the architecture of a complete volcanic-hosted massive sulfide hydrothermal alteration

- system ,Panorama District ,Pilbara ,western Australia [J]. *Economic Geology* 96(5): 1263 – 1278
- Eby G N. 1975. Abundance and distribution of the rare-earth elements and yttrium in the rocks and minerals of the Oka carbonatite complex ,Quebec [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta* 39(5): 597 – 620
- Gao Huai-zhong ,Zhang Wang-sheng. 1998. Geological characteristics and metallogenic condition of Kubusu gold deposit [J]. *Xinjiang Geology* 16(2): 118 – 124 ( in Chinese with English abstract)
- Gao Huai-zhong ,Sun Hua-shan ,Zhang Wang-sheng. 2000. Study of genetic relationship between dikes and gold orebodies in Kubusu gold deposit in east Junggar [J]. *Acta Petrologica Sinica* 16(4): 595 – 601( in Chinese with English abstract)
- Gao Huai-zhong ,Zhang Wang-sheng ,Sun Hua-shan. 2000. A product of plate collision—metallogenic control of highly strained structural belt to eastern Junggar gold deposit [J]. *Geology and Exploration* 36(3): 15 – 17( in Chinese with English abstract)
- Gan Lin ,Tang Hong-feng ,Han Yu-jie. 2010. Geochronology and geochemical characteristics of the Yemaquan granitic pluton in east Junggar ,Xinjiang [J]. *Acta Petrologica Sinica* 26(8): 2374 – 2388 ( in Chinese with English abstract)
- Grant J A. 1986. The isocon diagram—a simple solution to Gresens equation for metasomatic alteration [J]. *Economic Geology* 81: 1976 – 1982
- Guo Sun ,Ye Kai ,Chen Yi ,Liu Jing-bo ,Zhang Ling-min. 2013. Introduction of mass-balance calculation method for component transfer during the opening of a geological system [J]. *Acta Petrologica Sinica* 29(5): 1486 – 1498( in Chinese with English abstract)
- He Ying ,Zhang Jiang. 2012. Geological and geochemical characteristics of yemaquan gold deposit in Qinghe County ,Xinjiang Autonomous Region [J]. *Geological Prospect* 27(4): 469 – 478( in Chinese with English abstract)
- Hu Zhao-xin ,Ma Sheng-ming ,Zhu Li-xin ,Wang Hui-yan. 2014. Element enrichment and depletion regularity in the Matou porphyry Mo – Cu deposit of Anhui Province and their prospecting significance [J]. *Geology and Exploration* 50(3): 504 – 514( in Chinese with English abstract)
- Li Jin-yi ,Xiao Xu-chang ,Tang Yao-qing ,Zhao Ming ,Zhu Bao-qing ,Feng Yi-ming. 1990. Main characteristics of late paleozoic plate tectonics in the southern part of east Junggar ,Xinjiang [J]. *Geological Review* 36(4): 305 – 316( in Chinese with English abstract)
- Liu Jia-yuan ,Yu Heng-xiang ,Wu Guo-quan. 1999. Two kinds of alkaline granites in eastern Junggar ,Xinjiang and their geological significance [J]. *Bulletin of Mineralogy ,Petrology and Geochemistry* 18(2): 89 – 94( in Chinese with English abstract)
- Lottermoser B G. 1992. Rare earth elements and hydrothermal ore formation processes [J]. *Ore Geology Reviews* 7(1): 25 – 41
- Lv Rui-ying. 1995. Study of typomorphic characteristic of quartz from Kubusu gold deposit ,Xinjiang [J]. *Earth Science Journal of China University of Geoscience* 20(1): 53 – 57( in Chinese with English abstract)
- Ma Sheng-ming ,Zhu Li-xin ,Liu Chong-min ,Chen Xiao-feng ,Liang Sheng-yue. 2009. A study of the enrichment and depletion regularity of trace elements in porphyry Cu ( Mo ) deposits [J]. *Acta Geoscientica Sinica* 30(6): 821 – 810 ( in Chinese with English abstract)
- Michael Bau. 1991. REE mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and the significance of the oxidation state of europium [J]. *Chemical Geology* 93: 219 – 230
- Puchelt H ,Emmermann R. 1976. Bearing of rare earth patterns of apatites from igneous and metamorphic rocks [J]. *Earth and Planetary Science Letters* 31(2): 279 – 286
- Sverjensky D A. 1984. Europium redox equilibria in aqueous solution [J]. *Earth Planet Sci. Letter* 67(1): 70 – 78
- Wang Deng-hong ,Li Chao ,Chen Zheng-hui ,Wang Cheng-hui ,Huang Fan ,Qu Wen-jun. 2012. New application of molybdenite in the study on ore deposits: Rare earth elements geochemistry [J]. *Journal of Jilin University( Earth Science Edition)* 42(6): 1647 – 1655( in Chinese with English abstract)
- Wang Li-qiang ,Tang Ju-xing ,Wang Deng-hong ,Luo Mao-cheng ,Chen Wei ,Huang Fan. 2012. Rare earth element and trace element features of molybdenite in Bangpu Mo ( Cu ) deposit ,Maizhokunggar ,Xizang( Tibet ) ,and their constraints on the nature of ore-forming fluid [J]. *Geological Review* 58(5): 887 – 892( in Chinese with English abstract)
- Wang Jing-bin ,Wang Li-juan ,Wang Yu-wang ,Zhu He-ping. 2006. Yemaquan gold deposit: A structurally-controlled-altered-dyke type in eastern Junggar ,Xinjiang [J]. *Acta Petrologica Sinica* 22(9): 2349 – 2359( in Chinese with English abstract)
- Wang Rui ,Li Xia ,Dong Cheng ,Jin Xiao-ling ,Liu Ke. 2010. Migration regularity of major elements and REE in Wenglang structural altered rock type gold deposit ,Congjiang County [J]. *Mineral Deposits* 29(3): 489 – 500( in Chinese with English abstract)
- Wei Jun-hao ,Liu Cong-qiang ,Ding Zhen-ju. 2000. Active laws of element migration in wall-rock alteration processes for hydrothermal gold deposit: As evidenced by Dongping ,Hougou and Shuijingtun gold deposits [J]. *Acta Mineralogica Sinica* 20(2): 200 – 206( in Chinese with English abstract)
- Wass S Y ,Henderson P ,Elliott C J. 1980. Chemical heterogeneity and metasomatism in the upper mantle: Evidence from rare earth and other elements in apatite rich xenoliths in basaltic rocks from eastern Australia [J]. *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A* 297: 333 – 346
- Yang Gao-xue ,Yan Cun-xing ,Li Yong-jun ,Jin Zhao ,Wu Hong-en ,Si Guo-hui ,Xia Zhao-de. 2009. Characteristics and geological significance of microgranular dioritic enclaves in Kubusuan granodiorite form Kalamaili Area ,Junggar ,Xinjiang [J]. *Geological Science and Technology Information* 28(1): 38 – 44( in Chinese with English abstract)
- Zhao Zhen-hua. 1978. Geochemical characteristics of rare earth element and its application in research genesis of rock and ore deposit [J]. *Earth and Environment( Geology-Geochemistry)* 9: 1 – 11( in Chinese with English abstract)
- Zheng Yuan-chuan ,Gu Lian-xing ,Tang Xiao-qian ,Wu Chang-zhi ,Li Chun-hai ,Liu Si-hai. 2010. Element mobilization and mass-change



quantification of highly metamorphosed footwall alteration zones in Hongtoushan volcanogenic massive sulfide deposit, Liaoning Province [J]. Mineral Deposits, 29(5): 785–809 (in Chinese with English abstract)

#### [附中文参考文献]

- 艾金彪, 马生明, 朱立新, 席明杰, 樊连杰, 胡兆鑫, 张 燕. 2013. 安徽马头斑岩型钼铜矿床蚀变带常量元素迁移规律及其定量计算[J]. 矿床地质, 32(6): 1262–1274
- 高怀忠, 张旺生. 1998. 库布苏金矿地质特征及成矿条件分析[J]. 新疆地质, 16(2): 118–124
- 高怀忠, 孙华山, 张旺生. 2000. 东准噶尔库布苏金矿床岩脉与金矿成因关系的研究[J]. 岩石学报, 16(4): 595–601
- 高怀忠, 张旺生, 孙华山. 2000. 板块碰撞产物——强应变构造带对东准噶尔金矿的控制[J]. 地质与勘探, 36(3): 15–17
- 甘 林, 唐红峰, 韩宇捷. 2010. 新疆东准噶尔野马泉花岗岩体的年龄和地球化学特征[J]. 岩石学报, 26(8): 2374–2388
- 郭 顺, 叶 凯, 陈 意, 刘景波, 张灵敏. 2013. 开放地质体系中物质迁移质量平衡计算方法介绍[J]. 岩石学报, 29(5): 1486–1498
- 何 英, 张 江. 2012. 新疆青河县野马泉金矿床地质及地球化学特征[J]. 地质找矿论丛, 27(4): 469–478
- 胡兆鑫, 马生明, 朱立新, 王惠艳. 2014. 安徽马头斑岩型钼铜矿床元素富集贫化规律及其找矿意义[J]. 地质与勘探, 50(3): 504–514
- 李锦轶, 肖序常, 汤耀庆, 赵 民. 1990. 新疆东准噶尔卡拉麦里地区晚古生代板块构造的基本特征[J]. 地质论评, 36(4): 305–316
- 刘家远, 喻亨祥, 吴郭泉. 1999. 新疆东准噶尔两类碱性花岗岩及其地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 18(2): 89–94
- 吕瑞英. 1995. 新疆库布苏金矿石英英标型特征研究[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 20(1): 53–57
- 马生明, 朱立新, 刘崇民, 陈晓峰, 梁胜跃. 2009. 斑岩型 Cu(Mo) 矿床中微量元素富集贫化规律研究[J]. 地球学报, 30(6): 821–830
- 王登红, 李 超, 陈郑辉, 王成辉, 黄 凡, 屈文俊. 2012. 辉钼矿在成矿学研究中的新用途(1): 稀土元素示踪[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 42(6): 1647–1655
- 王立强, 唐菊兴, 王登红, 罗茂澄, 陈 伟, 黄 凡. 2012. 西藏墨竹工卡县邦铺钼(铜)矿床辉钼矿稀土—微量元素特征及对成矿流体性质的指示[J]. 地质论评, 58(5): 887–892
- 王京彬, 王莉娟, 王玉往, 朱和平. 2006. 新疆东准噶尔野马泉构造蚀变脉岩型金矿[J]. 岩石学报, 22(9): 2349–2359
- 王 睿, 李 霞, 董 成, 金晓玲, 刘 柯. 2010. 从江翁浪地区蚀变岩型金矿床常量元素及稀土元素迁移规律研究[J]. 矿床地质, 29(3): 489–500
- 魏俊浩, 刘丛强, 丁振举. 2000. 热液型金矿床围岩蚀变过程中元素迁移规律——以张家口地区东坪、后沟、水晶屯金矿为例[J]. 矿物学报, 20(2): 200–206
- 杨高学, 闫存兴, 李永军, 金 朝, 吴宏恩, 司国辉, 夏昭德. 2009. 东准噶尔库布苏南岩体中闪长质包体特征及其地质意义[J]. 地质科技情报, 28(1): 38–44
- 赵振华. 1978. 稀土元素地球化学特征及其在岩石和矿床成因研究中的应用[J]. 地质地球化学, 9: 1–11
- 郑远川, 顾连兴, 汤晓茜, 吴昌志, 李春海, 刘四海. 2010. 辽宁红透山块状硫化物矿床蚀变带元素迁移特征及定量计算[J]. 矿床地质, 29(5): 785–809

## Characteristics and Regularities of Mass Transfer in the Kubusu Gold Deposit of Clastic-Altered Rock Type in Qinghe County, Xinjiang

ZHENG Hai-ping<sup>1,2,3</sup>, ZHU Li-xin<sup>2</sup>, MA Sheng-ming<sup>3</sup>, JIANG Yu-qi<sup>1</sup>

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083;

2. Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100037;

3. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Science, Langfang, Hebei 065000)

**Abstract:** This paper focused on the northern belt of the Kubusu gold deposit in Xinjiang. It discussed the characteristics of element activity, mass transfer of metallogenic elements, associated elements, trace elements, major elements and rare earth elements in this area. It studies the environmental conditions and source of ore-forming fluids according to mass transfer and geochemical characteristics of rare earth elements. Degree and range of mass transfer were also studied in exploration line 105 of this belt based on the geochemical anomaly map of element mass transfer. The results show that the elements of ore-bearing diorite porphyrite veins and surrounding rocks played significant input and output roles, and the element migration has obvious regularities. Au, As, Bi, Ag, Sb, K<sub>2</sub>O, and SiO<sub>2</sub> were brought in to orebodies in metallogenic stage, suggesting that the fluids containing abundant Au, As, K<sub>2</sub>O, SiO<sub>2</sub> and so forth could cause alteration, making these elements move into orebodies and concentrate there. While Ba, Sr, Cu, MgO, Na<sub>2</sub>O, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and CaO moved out, implying that Ba, Sr, MgO, Na<sub>2</sub>O etc. were subject to hydrothermal alteration, causing these elements to flow out with fluids. The REE had also significant input and output, and light and heavy REEs before and after vein alteration all show obvious fractionation. After the vein alteration, the fractionation degree of light and heavy REEs had a decreasing trend. REE of ore-bearing diorite porphyrite veins distribution pattern is obviously dipping right and takes on light REE enrichment, strong Eu negative anomalies, weak Ce negative anomalies, showing that the property of Kubusu gold deposits ore-forming fluids should be in a high-temperature and reduction environment. Based on degree and range of mass transfer of veins and surrounding rocks, input indicator elements are As, W, Sb, and Bi, and output indicator elements are Mg and Na.

**Key words:** mass transfer, REE characteristics, ore-forming fluid, indicator elements, Kubusu gold deposit, Xinjiang